

Experiencia en mediciones de parámetros eléctricos de línea de doble terna de 220 kV.

Parte II. Mediciones de campo, determinación del modelo de secuencias y modos de propagación de la línea.

María Beatriz Barbieri
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Gustavo Barbera
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Santiago Barbero
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Patricia Arnera
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Pedro Issouribehere
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Raúl Bianchi Lastra
IITREE-FI-UNLP
Argentina

RESUMEN

Este artículo presenta la experiencia en mediciones de parámetros de una doble terna de 220 kV. En el trabajo correspondiente a la Parte I se ha indicado el procedimiento seguido y los resultados obtenidos de las tensiones y corrientes necesarias para la obtención de los elementos que conforman la matriz longitudinal de impedancia (Z) y la matriz transversal de admitancia (Y), ambas por unidad de longitud. Particularmente, se hace referencia a los elementos que se utilizan para excitar a la línea, así como también al instrumental empleado para efectuar los registros de campo.

Luego de presentados los resultados de las mediciones, los mismos se comparan con aquellos valores estimados a partir de las simulaciones digitales, las que se efectuaron previo a la tarea de campo. Se destaca que se ha obtenido una muy buena concordancia entre los valores medidos y aquellos calculados.

Asimismo, se procede al cálculo de los valores de impedancia de secuencias para distintas alternativas de conexión de la línea. Se analiza el modelo de parámetros de secuencias de líneas acopladas, el cual es utilizado en los programas tradicionales de análisis de sistemas de potencia para el cálculo de flujos de potencia y cortocircuito.

Por último, a partir de las matrices Z e Y obtenidas, se calculan los seis modos posibles de propagación estableciéndose los valores de impedancias características, velocidades de propagación y constantes de atenuación para cada modo (autovalores y autovectores característicos).

PALABRAS-CLAVE

“Parámetros” - “Secuencia” - “Impedancia” - “Admitancia” - “Modelo” - “Ensayos” - “Línea compacta” - “Doble terna” - “Simulaciones” - “Medición”

1. INTRODUCCIÓN

En esta Parte II se presenta el procedimiento llevado a cabo en campo para medir los parámetros de una línea doble terna, y a partir de estos parámetros medidos, se presenta la metodología y el cálculo para determinar los valores de impedancia y admitancia de secuencia usadas en la representación de los sistemas de potencia para estudios de flujos de potencia y cortocircuitos [4]. Del mismo modo, se presenta el cálculo de los 6 modos de propagación con sus impedancias características y velocidades asociadas, empleadas en la simulación de los transitorios electromagnéticos [3].

2. MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ADMITANCIA E IMPEDANCIA

2.1. Parámetros de admitancia transversal

El objeto de este ensayo fue justamente medir los parámetros de admitancia de la línea en doble terna. Para ello se ha considerado la nomenclatura e identificación de las fases detallada la Parte I del presente trabajo e indicada en la Fig. 1. Se efectuaron las mediciones en campo de tensiones y

corrientes necesarias para determinar los elementos que conforman dicha matriz [1 -5].

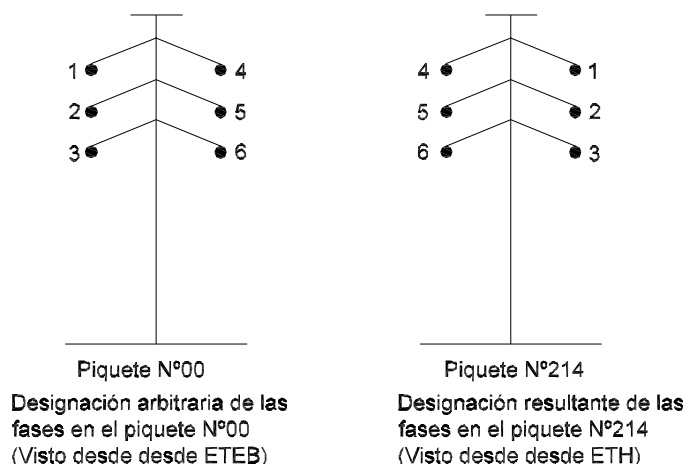


Fig. 1. Identificación relativa de fases en los dos extremos de la línea (ETEB y ETH).

En términos genéricos, dicha matriz es de la forma:

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A manera de ejemplo, la determinación de Y_{11} se efectúa de la siguiente manera:

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{U_1} \right|_{U_2=U_3=U_4=U_5=U_6=0} \quad (2)$$

La inyección de tensión y la correspondiente medición de corrientes se efectuaron en la ETEB. Por lo tanto, la Y_{11} corresponde al cociente entre la corriente que circula por el conductor 1 (I_1), al ser excitado este mismo conductor con una tensión de valor U_1 , cuando se vinculan a tierra todos los demás conductores en la ETEB y permanecen en circuito abierto la totalidad de los conductores en la ETH. Este conexionado se representa en la Fig. 2.

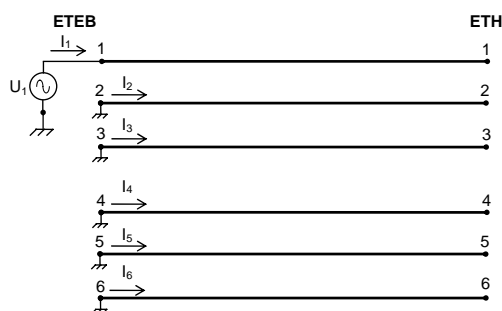


Fig. 2. Esquema de medición de variables para la obtención de la matriz Y.

Por otro lado, a partir de la medición de las corrientes inducidas derivadas a tierra en los demás conductores en la ETEB es posible determinar los elementos que completan la columna 1 de la matriz.

$$Y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \Big|_{U_2=U_3=U_4=U_5=U_6=0} \quad (3)$$

A continuación se excita el conductor de la fase 2, y a través del mismo procedimiento se obtienen los elementos correspondientes a la columna 2 de la matriz (Y_{i2}). Luego se hace lo propio con los conductores restantes (3, 4, 5 y 6) y se obtienen así las demás columnas de la matriz Y .

Procedimiento aplicado en campo

Habida cuenta de lo anterior, el procedimiento utilizado para llevar a cabo los ensayos en campo fue el siguiente:

- Luego de conectar la fuente de tensión al circuito con tensión nula se midieron tanto la corriente en ese conductor como las corrientes inducidas en el resto, lado ETEB. Se comprobó que las seis magnitudes eran nulas (0,000 A).
- Posteriormente, se aplicó una tensión del orden de 18 kV/50 Hz entre el conductor de la fase 1 y tierra (U_1) en la ETEB. Se midieron, además de la correspondiente tensión, las corrientes circulantes por los seis conductores. El desfase entre tensión y corriente no fue medido, ya que se consideró la carga capacitiva pura, resultando éste siempre de 90°.
- Luego se aplicó una tensión, también del orden de 18 kV, entre el conductor de la fase 2 y tierra, y se midieron esta tensión y las seis corrientes. Así fue posible obtener los parámetros de la columna 2 de la matriz.
- Se repitió el procedimiento energizando uno a uno los distintos conductores con el propósito de obtener las tensiones y corrientes necesarias para calcular los elementos de las columnas 3, 4, 5 y 6 que completan la matriz Y .

Para las mediciones se empleó un analizador trifásico de calidad eléctrica, con pinzas de corriente de 400 mV/A y corriente nominal 5 A - CAT III - 600 V. El mismo tiene una exactitud en la medición de la tensión de 0,5 % y cumple los requisitos establecidos en [8] Clase A.

Como fuente de alta tensión, se empleó un transformador bifásico de 0,25-0,5/20 kV. A su vez, dicho transformador fue alimentado por un autotransformador (0-250 V). En paralelo con el primario del transformador se interconectó un reactor con el fin de compensar el reactivo capacitivo de la línea.

Finalmente, y para medir la tensión en alta tensión, se empleó un transformador de medición, de relación 33/0,11 kV, clase 0,1 %.

2.2. Parámetros de impedancia longitudinal

De manera análoga al caso anterior se efectuaron mediciones en campo de tensiones, corrientes y desfases, necesarias para determinar la totalidad de los elementos que conforman la matriz de admitancia longitudinal. En términos genéricos, dicha matriz se presenta a continuación:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

En este caso la Z_{11} está dada por:

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=0} \quad (5)$$

Es decir, es el cociente entre la tensión U_1 aplicada al conductor de la fase 1 y la corriente circulante por dicho conductor (I_1), permaneciendo los cinco conductores restantes en la ETEB en circuito abierto y la totalidad de los conductores vinculados a tierra en la ETH (Fig. 3).

Bajo el mismo esquema de conexionado, a partir de la medición simultánea de la corriente I_1 y las tensiones inducidas en los conductores es posible calcular los restantes elementos Z_{i1} de la matriz: Excitando los otros conductores y midiendo las tensiones se calcula el resto los parámetros.

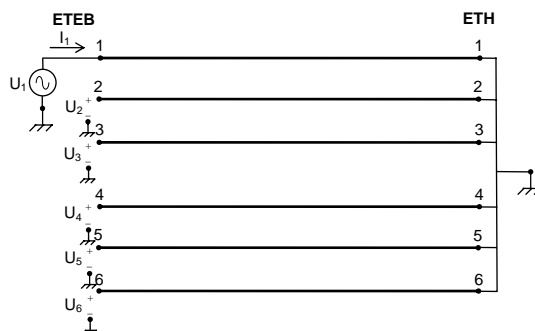


Fig. 3 -Esquema de medición de variables para la obtención de la matriz Z .

Procedimiento aplicado en campo

Tomando como base los conceptos teóricos aquí descriptos, el procedimiento empleado para efectuar las mediciones fue el siguiente:

- Luego de conectar la fuente de tensión al circuito con tensión nula se midieron tanto la tensión en ese conductor como las tensiones inducidas en el resto, lado ETEB. Se comprobó que las seis magnitudes eran despreciables.
- Se excitó entonces el conductor 1 con una tensión U_1 tal que la corriente circulante por dicho conductor fuera (I_1) del orden de 5 A, que es la corriente nominal de las pinzas utilizadas. Esta tensión resultó aproximadamente 54 V. Se midieron así la tensión aplicada (U_1), la corriente circulante por el conductor (I_1), las 5 tensiones inducidas en las demás fases (U_2, U_3, U_4, U_5 y U_6) y los desfases existentes entre I_1 y las seis tensiones.
- Luego se energizaron uno a uno los distintos conductores y se midieron las correspondientes tensiones, corrientes y desfases requeridos para el cálculo de los elementos restantes.

Para las mediciones de las tensiones y corrientes, se empleó el mismo instrumental descripto en el punto anterior. Como fuente de tensión, se utilizó un autotransformador de 0-250 Vca, y 22 A.

Luego de procesar los valores de tensiones y corrientes medidos se obtuvieron los parámetros de las matrices Z e Y por unidad de longitud considerando una longitud de 25,245 km (Tablas I y II).

Tabla I. Parámetros de la matriz Z .

$R \Omega/\text{km}$	1	2	3	4	5	6
1	0.129	0.054	0.051	0.060	0.054	0.049
2	0.054	0.100	0.045	0.056	0.048	0.043
3	0.051	0.045	0.087	0.053	0.044	0.041
4	0.060	0.056	0.053	0.130	0.056	0.049
5	0.054	0.048	0.044	0.056	0.095	0.044
6	0.049	0.043	0.041	0.049	0.044	0.088
$X \Omega/\text{km}$	1	2	3	4	5	6
1	0.398	0.172	0.136	0.129	0.129	0.120
2	0.172	0.433	0.194	0.132	0.148	0.146
3	0.136	0.194	0.448	0.125	0.148	0.158
4	0.129	0.132	0.125	0.426	0.189	0.152
5	0.129	0.148	0.148	0.189	0.446	0.200
6	0.120	0.146	0.158	0.152	0.200	0.451

Tabla II. Matriz de Capacidades de la línea doble terna.

$C \text{ nF}/\text{km}$	1	2	3	4	5	6
1	12.31	-2.91	-1.00	-1.11	-0.76	-0.45
2	-2.91	12.69	-3.02	-0.76	-0.92	-0.80
3	-1.00	-3.02	12.01	-0.46	-0.80	-1.27
4	-1.11	-0.76	-0.46	12.29	-2.92	-1.00
5	-0.76	-0.92	-0.80	-2.92	12.66	-3.01
6	-0.45	-0.80	-1.27	-1.00	-3.01	11.97

Los valores medidos de los parámetros se encontraron dentro de una banda menor al 3% para las capacidades y del orden del 10 % para las impedancias, calculados y mostrados en la Parte I. Respecto de las impedancias de la matriz Z, los valores calculados que mejor ajustaron a los medidos se corresponden con resistividades del terreno del orden de 3 Ω .m.

3. CÁLCULO DE LOS VALORES DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA

En este punto se determinan los valores de impedancias serie de secuencia positiva (Z_1), cero (Z_0) y admitancias en derivación (shunt) Y_1 (positiva) e Y_0 (cero).

3.1 Estimados a partir de aplicar tensiones de secuencia a las matrices medidas Z e Y.

Los casos de funcionamiento analizados son:

- Ambas ternas en paralelo, definiendo terna 1 (L1) constituida por los conductores (1,2,3) y terna 2 (L2) constituida por los conductores (4,5,6). (Ver Fig 1).
- Una terna en servicio (1,2,3) ó (4,5,6) y la otra terna puesta a tierra (4,5,6) o (1,2,3) en ambos extremos.

Para el cálculo de las impedancias se excita un extremo y se pone a tierra el otro extremo, y para el cálculo de la admitancia se deja abierto el otro extremo.

- Aplicación de tensiones de secuencia directa (1,2 3) (4,5,6).
- Aplicación de tensiones de secuencia homopolar (1,2 3) (4,5,6).

En la Tabla III se presentan los resultados para cada uno de los casos analizados

Tabla III. Resultados de las impedancias y admitancias medidas por fase aplicando tensiones de secuencia.

Excitación	Cond	Ohm/km Z	Ohm/km Z Promedio	uSimens/km Y	uSimens/km Promedios
L1_U1_sec +	1	0.1003 + 0.2526i	0.0563 + 0.2513i	-0.5202 + 4.4814i	0 + 4.6010i
L2_Puesta a tierra	2	0.0558 + 0.2348i		-0.0294 + 4.9179i	
Z1/Y1	3	0.0128 + 0.2664i	0.0544 + 0.2542i	0.5496 + 4.4036i	0+ 4.5924i
L1_Puesta a tierra	4	0.0973 + 0.2563i		-0.5233 + 4.4774i	
L2_U1_sec +	5	0.0485 + 0.2370i		-0.0254 + 4.9083i	
Z1/Y1	6	0.0175 + 0.2693i		0.5487 + 4.3914i	
U1_sec +	1	0.1092 + 0.2629i	0.0556 + 0.2617i	-0.6031 + 4.3234i	0+ 4.4623i
U1_sec +	2	0.0576 + 0.2370i		-0.0412 + 4.8735i	
Z1/Y1	3	0.0025 + 0.2783i		0.6423 + 4.2031i	
	4	0.1055 + 0.2696i		-0.6047 + 4.3195i	
	5	0.0500 + 0.2384i		-0.0360 + 4.8639i	
	6	0.0090 + 0.2839i		0.6428 + 4.1907i	
L1_U0_sec homo	1	0.1467 + 0.4791i	0.1023 + 0.5539i	0 + 2.6405i	0 + 2.4257i
L2_Puesta a tierra	2	0.0831 + 0.6292i		0 + 2.1249i	
Z0/Y0	3	0.0771 + 0.5533i		0 + 2.5117i	
L1_Puesta a tierra	4	0.1454 + 0.5370i	0.1004 + 0.5820i	0 + 2.6314i	0 + 2.4149i
L2_U0_sec homo	5	0.0773 + 0.6483i		0 + 2.1120i	
Z0/Y0	6	0.0785 + 0.5606i		0 + 2.5013i	
U0_sec homo	1	0.4100 + 0.8194i	0.3213 + 1.2192i	0 + 1.9116i	0 + 1.6545i
U0_sec homo	2	0.3014 + 1.4264i		0 + 1.3477i	
Z0/Y0	3	0.2417 + 1.2363i		0 + 1.7206i	
	4	0.5005 + 0.9805i		0 + 1.9022i	
	5	0.2683 + 1.5713i		0 + 1.3347i	
	6	0.2056 + 1.2816i		0 + 1.7104i	

3.2 Estimados a partir de aplicar la transformada de Fortescue o secuencia.

Este método de representación es usado por programas de cálculo de flujos y cortocircuitos [4].

Aplicando la transformada de secuencia tanto a corriente como tensiones [3, 4, 1] podemos obtener la matriz de impedancia y admitancia de secuencia. Adoptando la transformada T.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{+j\frac{2\pi}{3}} & e^{+j\frac{4\pi}{3}} \\ 1 & e^{+j\frac{4\pi}{3}} & e^{+j\frac{2\pi}{3}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{+j\frac{4\pi}{3}} & e^{+j\frac{2\pi}{3}} \\ 1 & e^{+j\frac{2\pi}{3}} & e^{+j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$U_{sec} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (8) \quad U_{fase} = T \cdot U_{sec} \quad (9)$$

$$I_{fase} = T \cdot I_{sec} \quad (10)$$

De modo que:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{fase} &= \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}_{sec} \quad (11) \\ T \cdot \mathbf{U}_{sec} &= \mathbf{Z} T \cdot \mathbf{I}_{sec} \quad (12) \\ \mathbf{U}_{sec} &= T^{-1} \cdot \mathbf{Z} T \cdot \mathbf{I}_{sec} \quad (13) \\ \mathbf{U}_{sec} &= \mathbf{Z}_{sec} \cdot \mathbf{I}_{sec} \quad (14) \end{aligned}$$

En los casos donde la matriz \mathbf{Z} tiene simetría, en particular cuando la línea es transpuesta la matriz impedancias de secuencia (\mathbf{Z}_{sec}) resulta diagonal, y por lo tanto se transforma el sistema de ecuaciones acoplados en otro sistema desacoplado [1-5]. En casos reales de líneas no transpuestas, si bien la impedancia de secuencia no es diagonal, los valores fuera de la diagonal son mucho menores, de modo tal que pueden despreciarse. En el caso de tener dos ternas acopladas, tal como es éste, la transformada para obtener las tensiones es:

$$T_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} U_{a^{L1}} \\ U_{b^{L1}} \\ U_{c^{L1}} \\ U_{a^{L2}} \\ U_{b^{L2}} \\ U_{c^{L2}} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{s0}^{L1} \\ U_{s1}^{L1} \\ U_{s2}^{L1} \\ U_{s0}^{L2} \\ U_{s1}^{L2} \\ U_{s2}^{L2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{U}_{sec} = T_{6 \times 6}^{-1} \cdot \mathbf{Z} T_{6 \times 6} \cdot \mathbf{I}_{sec} \quad (17)$$

$$\mathbf{I}_{sec} = T_{6 \times 6}^{-1} \cdot \mathbf{Y} T_{6 \times 6} \cdot \mathbf{U}_{sec} \quad (18)$$

$T_{6 \times 6}^{-1} \cdot \mathbf{Z} T_{6 \times 6} - (19) \rightarrow \mathbf{Z}_{sec}$ Matriz de impedancia serie de secuencia

$T_{6 \times 6}^{-1} \cdot \mathbf{Y} T_{6 \times 6} - (20) \rightarrow \mathbf{Y}_{sec}$ Matriz de admitancia shunt de secuencia

Para el caso de ambas ternas energizadas se obtiene la matriz de secuencia tanto para \mathbf{Z} como para \mathbf{Y} usando (19) y (20). Estas matrices de secuencia tienen, aparte de la diagonal, un término de acoplamiento de la secuencia cero u homopolar de ambas ternas con valor significativo. En la secuencia positiva y negativa no existe prácticamente acoplamiento. En las Tablas IV y V se aprecia este resultado, se colorea en verde los parámetros propios de la terna L1, y en amarillo los propios de la terna L2, en rosado los mutuos entre ambas ternas, aparece solo el mutuo de secuencia cero.

Tabla IV. Resultado de la matriz impedancia longitudinal de secuencia.

Zsec =	Ohm/km				
0_L1	1_L1	2_L1	L1-L2_0	L1-L2_1	L1-L2_2
0.2053 + 0.7610i (Z0L1)	0.0203 - 0.0324i	0.0082 - 0.0231i	0.1493 + 0.4117i (Z0m)	0.0101 - 0.0167i	0.0095 - 0.0092i
0.0082 - 0.0231i	0.0555 + 0.2592i (Z1L1)	-0.0185 + 0.0105i	0.0082 - 0.0144i	-0.0002 + 0.0114i	-0.0087 + 0.0060i
0.0203 - 0.0324i	0.0318 + 0.0145i	0.0555 + 0.2592i (Z2L1)	0.0053 - 0.0196i	0.0063 + 0.0054i	-0.0002 + 0.0120i
0.1493 + 0.4117i	0.0053 - 0.0196i	0.0082 - 0.0144i	0.2037 + 0.8017i (Z0L2)	0.0248 - 0.0217i	0.0064 - 0.0136i
0.0095 - 0.0092i	-0.0002 + 0.0120i	-0.0087 + 0.0060i	0.0064 - 0.0136i	0.0549 + 0.2609i Z1L2	-0.0158 + 0.0142i
0.0101 - 0.0167i	0.0063 + 0.0054i	-0.0002 + 0.0114i	0.0248 - 0.0217i	0.0298 + 0.0101i	0.0549 + 0.2609i Z2L2
L1-L2_0	L1-L2_1	L1-L2_2	0_L2	1_L2	2_L2

Tabla V. Resultado de la matriz admitancia en derivación de secuencia.

Ysec	Siemens/km		x 1.0e-005		
0_L1	1_L1	2_L1	L1-L2_0	L1-L2_1	L1-L2_2
0 + 0.2426i	-0.0112 + 0.0107i	0.0112 + 0.0107i	0 - 0.0766i (Y0m)	0.0004 + 0.0018i	-0.0004 + 0.0018i
0.0112 + 0.0107i	0.0000 + 0.4601i	0.0409 - 0.0227i	-0.0004 + 0.0018i	-0.0001 - 0.0134i	0.0086 - 0.0042i
-0.0112 + 0.0107i	-0.0409 - 0.0227i	0.0000 + 0.4601i	0.0004 + 0.0018i	-0.0086 - 0.0042i	0.0001 - 0.0134i
0 - 0.0766i (Y0m)	0.0004 + 0.0018i	-0.0004 + 0.0018i	0 + 0.2415i	-0.0112 + 0.0108i	0.0112 + 0.0108i
-0.0004 + 0.0018i	0.0001 - 0.0134i	0.0086 - 0.0042i	0.0112 + 0.0108i	0.0000 + 0.4592i	0.0411 - 0.0223i
0.0004 + 0.0018i	-0.0086 - 0.0042i	-0.0001 - 0.0134i	-0.0112 + 0.0108i	-0.0411 - 0.0223i	0.0000 + 0.4592i
L1-L2_0	L1-L2_1	L1-L2_2	0_L2	1_L2	2_L2

3.3 Transformaciones modales. Obtención de impedancia y admitancia modales.

En los estudios de transitorios [3] se pretende desacoplar totalmente las ecuaciones diferenciales de las ondas de las líneas de transmisión multifilares. Se utilizan transformadas que diagonalizan el producto de matrices $Z \cdot Y$, obteniéndose la transformada de tensión T_v , y el producto de matrices $Y \cdot Z$ obteniéndose la transformada de corriente T_i , [3, 6]. Este método permite obtener los valores propios de $Z \cdot Y$ e $Y \cdot Z$ que son coincidentes y por lo tanto se obtienen iguales constantes de fase (velocidades de propagación y atenuaciones) para las tensiones y para las corrientes [6]. Con este método se puede representar la línea como la superposición de los efectos de cada modo, y cada modo se resuelve con las ecuaciones diferenciales de una línea unifilar con su impedancia característica y su velocidad de propagación [3]. Cuando la línea es totalmente transpuesta las transformadas T_v y T_i son coincidentes y estas pueden describirse con la transformada de Clarke. [3, 6, 7].

Se procedió a calcular para el caso de doble terna y a partir de las matrices medidas Z e Y a 50 Hz las transformadas T_v , T_i [3] (autovectores) y las constantes de propagación (velocidades y atenuaciones) autovalores [6]. Se verifica que las transformadas T_v y T_i tienen valores complejos pero suele usarse solo la parte real [3,6], obteniéndose resultados aceptables.

También se obtienen los valores de la **matriz de impedancia (Z_{modo})** y **admitancia de modo (Y_{modo})**, que resultan diagonales siendo $Z_{\text{modo}} = T_v^{-1} \cdot Z \cdot T_i$, $Y_{\text{modo}} = T_i^{-1} \cdot Y \cdot T_v$, [3, 6, 7]. En la tabla VI se muestran las transformadas T_v y T_i y en la Tabla VII las Z_{modo} , Y_{modo} , impedancia característica, velocidad de propagación y atenuación de cada modo.

Tabla VI. Transformadas de tensión y corriente. Cada columna es el autovectores del modo.

Tv						Ti					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0.38	0.81	0.15	0.22	-0.35	-0.22	0.40	0.77	0.09	0.25	-0.26	-0.17
0.39	-0.32	0.42	-0.33	-0.33	-0.33	0.29	-0.42	0.39	-0.35	-0.35	-0.33
0.40	0.00	0.53	-0.09	0.47	0.39	0.39	0.02	0.57	0.04	0.52	0.40
0.43	-0.47	-0.25	0.58	-0.31	0.07	0.51	-0.45	-0.19	0.61	-0.23	-0.01
0.41	0.07	-0.46	-0.44	-0.21	0.60	0.30	0.13	-0.46	-0.48	-0.25	0.60
0.41	0.00	-0.41	-0.20	0.46	-0.44	0.40	0.01	-0.41	-0.09	0.48	-0.49
2.42	0.09	-0.02	-0.26	-0.27	0.07	2.30	0.07	-0.01	-0.02	-0.11	0.00

Tabla VII. Impedancia y admitancia modales por unidad de longitud, impedancia característica y velocidad de propagación y atenuación de cada modo.

Modo	Z _{modo}	Y _{modo}	Z _{característica}	Velocidad	alfa
	Ohm/km	uSiemens/km	Ohm	km/s	x1E-4 1/km
1- Tierra	0.1971 + 1.1734i	0.2121 + 1.6967i	834	222600	2.066
2- Aire	0.0655 + 0.2492i	0.0375 + 4.6357i	234	290000	1.44537
3- Aire	0.0412 + 0.3584i	0.0833 + 3.3007i	330	288550	0.7622
4- Aire	0.0223 + 0.2733i	0.6029 + 4.4004i	248	286370	1.19913
5- Aire	0.0802 + 0.2855i	-0.3532 + 4.0830i	265	286230	1.03266
6- Aire	0.0517 + 0.2499i	-0.0725 + 4.6930i	232	288360	1.03047

4. CONCLUSIONES

- La determinación de la matriz Z e Y de la doble terna no transpuesta permite obtener los parámetros de secuencia en cualquier configuración de energización de los 6 conductores de la línea.
- Los valores medidos de los elementos de las matrices Z e Y de la línea están dentro una banda de apartamiento menor al 3% para las capacidades y del orden del 10 % para las impedancias, calculados y mostrados en la Parte I. Respecto de las impedancias que constituyen la matriz Z , los valores calculados que mejor ajustaron a los medidos se corresponden con resistividades del terreno del orden de 3 $\Omega \cdot m$.

- Los valores de impedancias y admitancia por fase promediadas obtenidas a partir de la excitación con secuencia positiva (1_L1 y 1_L2), coinciden con las calculadas a través de la transformada de Fortescue (matriz Z_{sec} , Y_{sec}).
- Los valores de impedancias y admitancia por fase promediadas obtenidas a partir de la excitación con secuencia cero no coinciden con las calculadas a través de la transformada de Fortescue (matriz Z_{sec} , Y_{sec} , 0_L1 y 0_L2). Esto se debe a que existe una impedancia y admitancia de secuencia cero de acoplamiento entre ambas ternas (L1_L2_0), entonces el valor obtenido como promedio de los valores por fase se corresponden con $Z_{sec}oL1+Z_{sec}om$.y $Y_{sec}oL1+Y_{sec}om$, $Z_{sec}oL2+Z_{sec}om$.y $Y_{sec}oL2+Y_{sec}om$; para la línea 1 y 2 respectivamente.
- La transformación modal permite identificar las impedancias características y velocidades de propagación del modo de tierra y de 5 modos de aire.
- En el modo 1 la corriente de cada conductor retorna por el terreno, la suma tanto de la columna 1 de T_v y T_i da 2,4 y 2,3 respectivamente. Este modo es el modo homopolar y sus parámetros característicos coinciden con tal. En los modos 2, 4, 5, 6 prácticamente las corrientes se compensan en cada terna (la suma de los autovectores de cada terna da aproximadamente cero), estos modos coinciden con los **parámetros característicos de secuencia positiva (o negativa)**. En cambio en **el modo 3** las corrientes de una terna son todas positivas y las de la otra son todas negativas y su suma es cero, por lo que este modo no es un modo de tierra. Este modo **es un modo entre ternas**, de ahí que sus parámetros característicos no sean similares a los de secuencia positiva o cero de una terna.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.V. Bewley “*Travelling waves on transmissin System*”. Second edition. Dover publication Inc. New York 1963
- [2] Edited by Juan A. Martinez-Velasco “*Power System Transients. Parameter Determination*”. CRC Press Taylor & Francis Group. 6000 Broken Sound Parkway NW, 2010
- [3] *EMTP/ATP . Theory Book*.
- [4] *Program Application Guide PSS/E V30*
- [5] Rubens Dario Fuchs “*Transmissao de Energia Elétrica. Linhas Aéreas*”. 2da edição.
- [6] C. Gary, M. Moreau “*L’effet de Couronne em Tension alternative*”.EYROLLES 1976.
- [7] Afonso José do Prado, José Pissolato Filho, Sérgio Kurokawa, and Luiz Fernando Bovolato. “*Modal Transformation Analyses for Double Three-Phase Transmission Lines*”. IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, pp.1926 - 1936, Jul. 2007.
- [8] Norma IEC 61000-4-30. “*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*”.